

A Dual-Function Polarization-Selective Beam Splitter Based on a Subwavelength Multi-Subpart Profile Grating Structure

Linfei Ma^{1,2}, Wenbo Xiao^{1,2}, Huaming Wu^{1,2*}, Huanhuan Xu^{1,2}, Yongsheng Xiao³, Lizhen Huang³, Junhong Duan^{1,2}

¹National Engineering Laboratory for Non-Destructive Testing and Optoelectronic Sensing Technology and Applications, Key Laboratory of Non-Destructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Jiangxi

²Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

³School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Email: *Cookey106@126.com

Received: Sep. 8th, 2016; accepted: Sep. 27th, 2016; published: Sep. 30th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, a dual-function polarization selective beam splitter (PSBS) constructed by only a single layer subwavelength multi-subpart profile grating is presented. Rigorous coupled-wave analysis is adopted to investigate the properties of the structure. It is shown that for transverse electric (TE) polarized wave, the device demonstrates very high reflectivity (>97%) from 1.46 to 1.58 μm ; and for transverse magnetic (TM) polarized wave, at the wavelength of 1.55 μm , it exhibits about 50/50 beam ratio under normal incidence. To evaluate the response of the PSBS under variation in structure parameters, we also investigated the fabrication tolerances of the device.

Keywords

Diffraction and Gratings, Polarizing Beam Splitters (PBSs), Leaky-Mode Resonance (LMR)

基于亚波长多齿光栅结构的双功能偏振选择分束器的研究

马林飞^{1,2}, 肖文波^{1,2}, 吴华明^{1,2*}, 徐欢欢^{1,2}, 肖永生³, 黄丽贞³, 段军红^{1,2}

*通讯作者。

文章引用: 马林飞, 肖文波, 吴华明, 徐欢欢, 肖永生, 黄丽贞, 段军红. 基于亚波长多齿光栅结构的双功能偏振选择分束器的研究[J]. 应用物理, 2016, 6(9): 193-203. <http://dx.doi.org/10.12677/app.2016.69025>

¹无损检测与光电传感技术及应用国家地方联合工程实验室、无损检测技术教育部重点实验室，江西 南昌

²江西省光电检测技术工程实验室、南昌航空大学测试与光电工程学院，江西 南昌

³南昌航空大学信息工程学院，江西 南昌

Email: ^{*}Cookey106@126.com

收稿日期：2016年9月8日；录用日期：2016年9月27日；发布日期：2016年9月30日

摘 要

本文主要介绍了一种基于单层微纳多齿谐振光栅的双功能偏振分束器。严格耦合波理论分析表明，在垂直入射时，对于TE偏振光(电场平行于光栅槽线)来说，该器件在1.46~1.58 μm 宽谱范围内，其反射率大于97%；而对于TM偏振光(磁场平行于光栅槽线)来说，该结构在1.55 μm 波长处，能够实现50/50反射和透射分束比。此外，为了分析此器件对结构参数变化的响应，我们还分析了此结构的工艺容差性。

关键词

衍射光栅，泄露模谐振，偏振分束器

1. 介绍

偏振分束器(polarizing beam splitter, PBS)是一种能将非偏振光分解成两束正交的线偏振光的基本功能元件[1]。它在光学信息处理系统中有着广泛地应用，如：磁光数据储存[2]、自由空间光交换[3]、光路由、量子计算、光开关[4]等。

常用的偏振分束器大多是基于晶体的双折射效应，或是以多层介质膜为基础。以晶体双折射效应为基础的偏振分束器需要较大尺寸才能实现偏振分束的目的，体积大，昂贵，且难于与光路集成；而以多层介质膜为基础的偏振分束器需要很多层的介质膜才能获得高的消光比[5]，这对于介质膜厚度以及折射率分布的控制是一个很大的挑战。

近年来，随着微纳光学和微细加工技术的发展，基于光栅结构简单、易于集成、制作工艺简单等优点，微纳光栅在缩小光电子器件的尺寸，减小器件的功耗，提高光电器件的集成度和性能，实现功能丰富的大规模光电集成回路等方面发挥着日益重要的作用。另外，光栅的衍射特性表现出强烈的偏振相关性，因此，可利用光栅来实现偏振分束的功能。近年来，人们先后提出了三种不同的光栅偏振分束器：一是能同时透射 TM 和 TE 偏振光的光栅偏振分束器[6]；二是能同时反射 TM 偏振光和 TE 偏振光的光栅偏振分束器[7]；三是反射 TM (或 TE)、透射 TE (或 TM)偏振光的光栅偏振分束器[8]。如张新彬等利用模式方法设计了用于 532 nm 绿光的石英透射偏振分束光栅，但是其所需的光栅深度比较大[9]。

为了提高偏振分束器消光比，或是为了提高偏振分束器的带宽，有研究小组又将目光转向了双光栅结构的偏振分束器。

2007 年，北京大学周治平教授课题组报道了一种具有较高耦合效率与消光比的双光栅结构的偏振分束耦合器[10]。理论分析表明，该结构上层光栅对 TE 偏振光的耦合效率为 58%，下层光栅对 TM 偏振光的耦合效率为 50%，两层光栅偏振消光比在 1530~1570 nm 的波长范围内均大于 20 dB，在 1550 nm 处获得最大消光比 28 dB [11]。后来，上海光学及精密机械研究所的周常河研究小组报道了一种双层光栅结构的偏振分束器。计算表明，该器件在 1480~1620 nm 波段范围内，其 0 级 TM 偏振光的透射率大于 95%，

而-1级TE偏振光的透射率大于92% [12]。2011年,北京大学周治平教授课题组又提出了一种基于绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)材料系统的二元闪耀光栅耦合器,采用双层亚波长二元闪耀光栅结构,可以实现 1×4 功率分束和耦合的功能,经时域有限差分算法(finite-difference time-domain method, FDTD)分析表明,其层与层之间的功率差为0.028,端口与端口之间的功率差为0.034 [13]。

然而上述亚波长光栅器件功能或单一、结构或复杂,鉴于此,本文设计了一种亚波长多齿双功能光栅偏振分束器,基于泄露模谐振原理,此器件在较宽的波段范围内对TE偏振光显示出较高的反射率,而在中心波长处,对TM光表现出50/50反射和透射光比。

2. 严格耦合波分析方法简介

在本小节中,我们将简要介绍下严格耦合波分析方法(rigorous coupled-wave analysis, RCWA) [14] [15]。总体来说,严格耦合波分析方法求解光栅衍射场分布过程大致分为三步:首先,由麦克斯韦方程组导出入射介质层和基底层光场的表达式;然后,利用傅里叶级数展开光栅层的介电常数,推导出耦合波微分方程组;最后,在不同区域边界上运用电磁场边界条件,采用一定的数学手段求解各个衍射级次的振幅及衍射效率。对于平面衍射问题,入射光总可分解为TE和TM两种线偏振光的迭加,且反射和透射的衍射波都位于入射面内。

对于图1所示多齿光栅结构,其轮廓沿 y 方向保持不变,沿 x 方向周期变化,且周期为 T 。沿 z 向把研究区域分成三层: $z < 0$ 为入射介质层,其折射率为 n_1 ; $z > t_g$ 为基底层,其折射率为 n_3 ; $0 < z < t_g$ 为光栅层,是由 q 个折射率为 n_{21} 的光栅齿和 q 个折射率为 n_{22} 的沟槽组成。设入射光频为 ω ,其入射角为 θ ,光栅高度为 t_g ,跳变点为 x_1, x_2, x_3, \dots 。为简单起见,时谐因子 $\exp(-j\omega t)$ 在后面的推导中省略不计。

如图1所示,光栅层的相对介电常数具有周期性,即 $\varepsilon_2(x) = \varepsilon_2(x+T)$,用傅里叶级数展开,其可表示为

$$\varepsilon_2(x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} c_m \exp\left(j \frac{2\pi m x}{T}\right) \quad (1)$$

其中,

$$c_m = \frac{1}{T} \left[\int_{x_0}^{x_1} n_{21}^2 \exp\left(-j \frac{2\pi m x}{T}\right) dx + \int_{x_1}^{x_2} n_{22}^2 \exp\left(-j \frac{2\pi m x}{T}\right) dx + \dots \right. \\ \left. + \int_{x_{k-1}}^{x_k} n_{21}^2 \exp\left(-j \frac{2\pi m x}{T}\right) dx + \int_{x_k}^T n_{22}^2 \exp\left(-j \frac{2\pi m x}{T}\right) dx \right] \quad (2)$$

令 $x_0 = 0$,我们可以得到

$$c_m = \begin{cases} n_{22}^2 + \frac{(n_{22}^2 - n_{21}^2)}{T} \sum_{k=1}^l (-1)^k x_k, & m = 0 \\ \frac{j(n_{22}^2 - n_{21}^2)}{2\pi m} \sum_{k=0}^l (-1)^k \exp\left(-j \frac{2\pi m x_k}{T}\right) & m \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 $l = 2q - 1$ 为跳变点个数。

我们以入射TE偏振光为例,来讨论其衍射场分布情况。设入射电场为

$$E_{inc,y} = \exp\left[-jk_0 n_1 (\sin \theta x + \cos \theta z)\right] \quad (4)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为光在真空中波长。

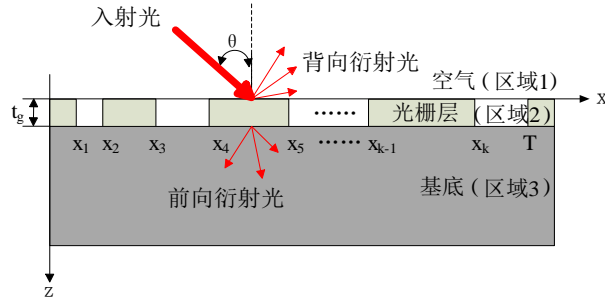


Figure 1. Grating with multi-subpart profiles
图 1. 多齿光栅结构示意图

再根据耦合波方程，可以分别确定背向衍射级效率 η_{ri} 和前向衍射级效率 η_{fi}

$$\eta_{ri} = \text{Re} \left(\frac{k_{1zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) |R_i|^2 \quad (5)$$

$$\eta_{fi} = \text{Re} \left(\frac{k_{3zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) |T_i|^2 \quad (6)$$

其中 j 为虚数单位， $j = \sqrt{-1}$ ， R_i 为第 i 级背向衍射光归一化振幅强度， T_i 为第 i 级前向衍射光归一化振幅强度。 k_{xi} 由下式确定：

$$k_{xi} = k_0 \left(n_1 \sin \theta - \frac{i\lambda_0}{T} \right) \quad (7)$$

$$k_{rzi} = \begin{cases} \sqrt{k_0^2 n_r^2 - k_{xi}^2} & k_{xi} < k_0 n_r \\ -j\sqrt{k_{xi}^2 - k_0^2 n_r^2} & k_{xi} > k_0 n_r \end{cases} \quad r = 1, 3 \quad (8)$$

由式(5)和(6)可以确定各参数对光栅衍射效率的影响。

3. 亚波长多齿双功能光栅偏振分束器

3.1. 结构设计

本小节中，我们将利用粒子群优化算法结合严格耦合波分析方法进行多齿双功能光栅偏振分束器的结构与优化。

如图 2 所示，为亚波长多齿双功能光栅偏振分束器结构示意图。一束平面单色光垂直照射到此结构上，通过光栅层，TE 偏振光在 0 级被高效的反射，而 TM 偏振光在中心波长处，其 0 级能够实现 50/50 反射与透射比，从而达到双功能偏振分束的目的。本文中，假定光栅在 y 方向上无限延伸，且组成光栅的介质材料是无损耗的，材料的色散也忽略不计。在本文中，我们采用严格耦合波分析方法结合粒子群算法对其进行设计和参数优化，以得到最佳的性能[16] [17]。

此亚波长多齿光栅是由如下参数定义的：光栅周期(T)，厚度(t_g)以及光栅跳变点(x_1, x_2, x_3)。入射介质为空气，基底为二氧化硅。介质折射率： $n_{\text{air}} = 1.0$ ， $n_{\text{Si}} = 3.48$ ， $n_{\text{silica}} = 1.47$ 。采用严格耦合波分析法结合粒子群算法，得到光栅优化参数如下： $T = 0.9 \mu\text{m}$ ， $t_g = 0.39 \mu\text{m}$ ， $x_1/x_2/x_3 = 0.09/0.39/0.73 \mu\text{m}$ 。

3.2. 结果及分析

图 3(a)所示为此双功能光栅偏振分束器在垂直入射时，TE 偏振光的 0 级反射率(TE/R_0)和 TM 偏振光

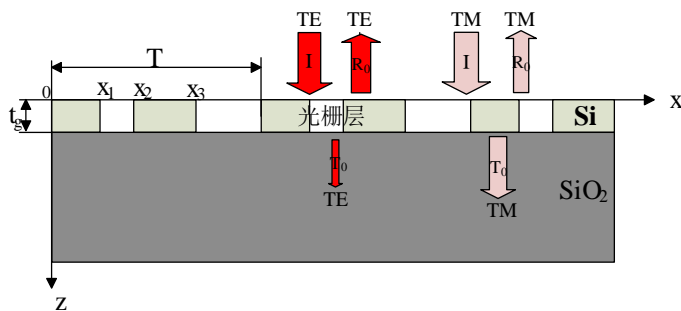


Figure 2. Schematic of a grating polarization selective beam splitter (PSBS). We denote T , t_g , x_1 , x_2 and x_3 as the grating period, thickness, and transition points, respectively. The incidence medium is air, and the substrate is silica. The refractive indices are: $n_{\text{air}} = 1.0$, $n_{\text{Si}} = 3.48$, $n_{\text{silica}} = 1.47$

图 2. 亚波长多齿双功能光栅偏振分束器结构示意图。 T , t_g , x_1 到 x_3 分别表示光栅周期, 厚度以及跳变点。入射介质为空气, 基底为二氧化硅。介质折射率参数如下: $n_{\text{air}} = 1.0$, $n_{\text{Si}} = 3.48$, $n_{\text{silica}} = 1.47$

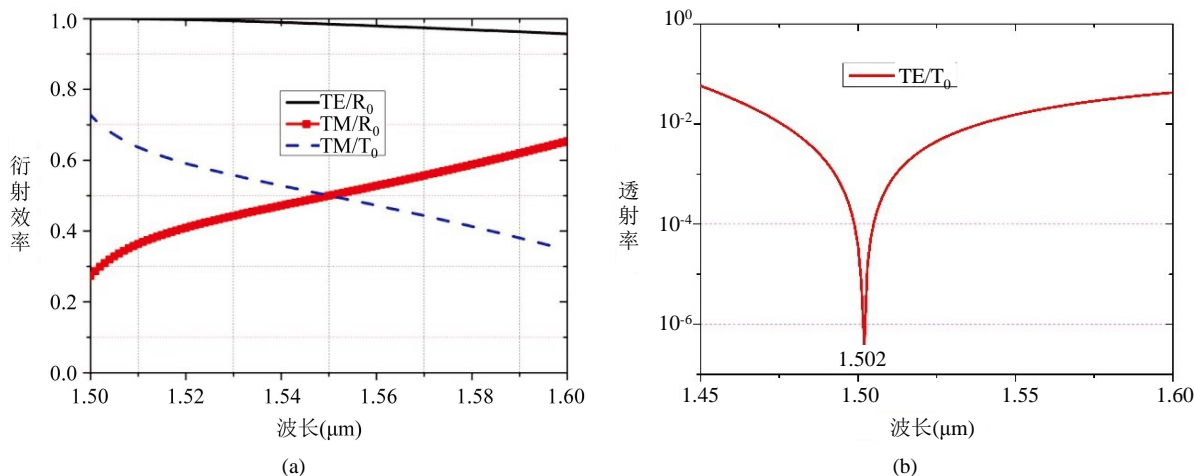


Figure 3. Spectra of the structure shown in **Figure 1**. (a) Diffraction spectra of the device; (b) Transmissivity of the grating PSBS at a log scale. The resonance wavelength is $1.502 \mu\text{m}$

图 3. 图 1 所示亚波长多齿双功能光栅偏振分束器衍射率随波长变化曲线。(a) 偏振分束器的衍射效率随波长变化曲线; (b) TE 偏振光的对数坐标透射谱响应曲线, 谐振波长为 $1.502 \mu\text{m}$

0 级反射率和透射率(TM/R_0 , TM/T_0)随波长变化曲线图。如图所示, 在 1.46 到 $1.58 \mu\text{m}$ 波段范围内, 此器件 TE 波的 0 级反射率大于 97% ($R_0 > 99\%$), 而 TM 波在中心波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 其 0 级反射率和透射率各为 50% , 能实现功率分束的目的。图 3(b)所示为 TE 偏振光透射率的对数坐标曲线, 由图可知, 在 $1.502 \mu\text{m}$ 处, TE 波存在一个透射谷点, 其对应着一个泄露模谐振点[18]。这表明, 此器件 TE 偏振光的高反射效率及宽带特性来源于此 TE 波的泄露模谐振。从本质上来说, 泄露模谐振的发生是源于入射光与光栅中的泄露模相位相匹配[19]。理论分析表明, 谐振时, 在光栅衍射谱中, 其 0 级反射率几乎将近 100% , 反射波和透射波发生高效的能量交换[20]。

此器件在 $1.502 \mu\text{m}$ 处, TE 波发生谐振。另外, 此结构的高反射率及宽带特性还与构成材料的高折射率差及顶层光栅多齿形状调制有关[21] [22]。首先, 高折射率差(high-index-contrast)光栅层能够扩展谐振区域, 从而有利于高反射率、宽谱特性的形成。其次, 顶层光栅的多齿形状调制能够有效防止此双功

能光栅器件的泄露模的快速衰减, 这点有利于提高 TE 波获得宽带、高反射率的可能性, 增强器件性能。

器件的角度响应谱(反映衍射效率随入射角度的变化关系)也是一个衡量器件性能的重要参考指标, 鉴于此, 我们还考察了此结构的角度响应谱。如图 4 所示, 对于 TE 偏振光此结构在 $-13.86^{\circ}\sim 13.86^{\circ}$ 角度范围内; 而对于 TM 偏振光来说, 其 0 级反射和透射率比例都大于 45/55 在 $-3.15^{\circ}\sim 3.15^{\circ}$ 角度范围内, 这相对较宽角度谱使得在微光学系统中遇到的对准问题变得相对简单些。

由于时域有限差分算法(finite-difference time-domain method, FDTD)是设计和分析微纳结构强大且精确的数值算法, 因此, 我们采用了时域有限差分算法来分析此结构的光场分布特性。如图 5 所示, 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处, 假定此器件被一束平面单色光垂直照射, 经光栅后, TE 偏振光被高效的反射, 而 TM 偏振光能够实现 50/50 的反射和透射光束比, 这与设计要求是一致的。

4. 参数分析

本小节讨论此偏振分束器的工艺容差性, 即通过严格耦合波分析法考察光栅厚度、周期以及调制形状等关键结构参数变化对此器件性能的影响。

图 6 所示为光栅厚度(t_g)变化对此器件 0 级衍射率的影响。如图 6(a)所示, 随着光栅厚度的增加, TE 波的 0 级反射谱将向长波长移动, 这是由于器件带宽取决于光栅厚度, 随着光栅厚度的增加, 其带宽也相应增大; 而对于 TM 偏振光来说, 图 6(b)、图 6(c)所示, 其在 $1.543\ \mu\text{m}\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 波段范围内, 分束比仍保持大于 45/55, 这点有利于器件的制作。

图 7 所示为光栅周期(T)变化对此结构 0 级衍射率的影响。如图 7(a)所示, 在周期 T 变化 $40\ \text{nm}$ 范围内, 在 $1.5\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波段内, 分束器反射谱变化很小。对于 TM 波来说, 如图 7(b)、图 7(c)所示, 此结构在 $1.545\ \mu\text{m}\sim 1.551\ \mu\text{m}$ 波段内, 其分束比大于 45/55。

此外, 我们还考察了调制形状工艺误差对双功能偏振分束器性能的影响。如图 8 所示, 调制形状参数的改变能够稍稍改变器件性能。因为除了光栅层的调制强度, 其调制形状也能控制分束器的衍射效率分布, 调制形状的改变能使得光栅层的泄露模的简并度、谐振位置发生变化, 从而使得分束器性能改变[23]。

从上述参数分析可知, 此结构具有比较合理的工艺容差性能, 这点有利于器件制作。

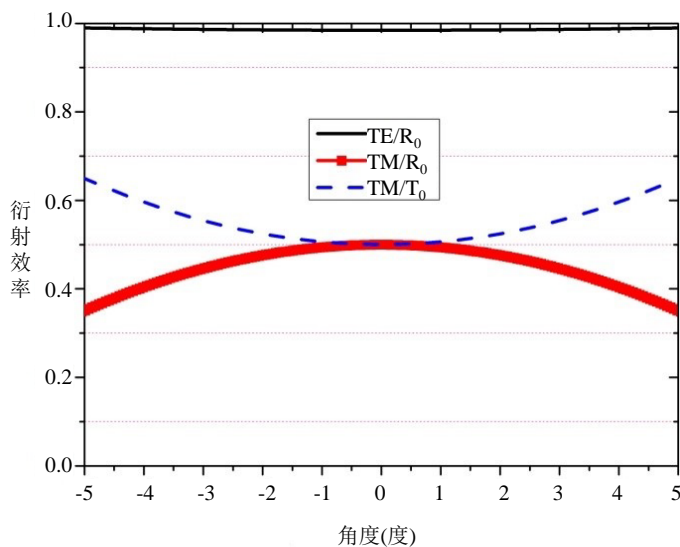


Figure 4. Angular spectrum of the grating PSBS at the wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$

图 4. 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处, 衍射效率随入射角度变化曲线

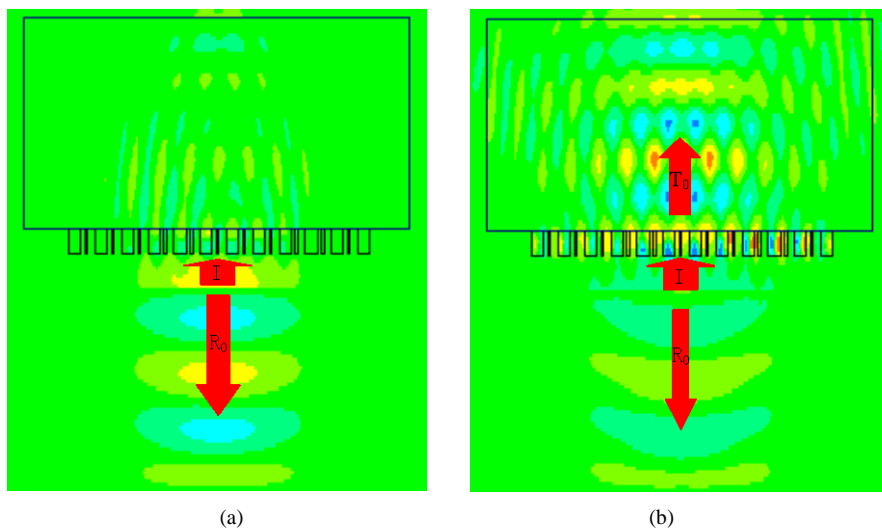


Figure 5. Field distribution at 1.55 μm . (a) TE and (b) TM polarized input wave
图 5. 在 1.55 μm 处, 时域有限差分算法模拟光场分布图。(a) TE 和(b) TM 偏振光

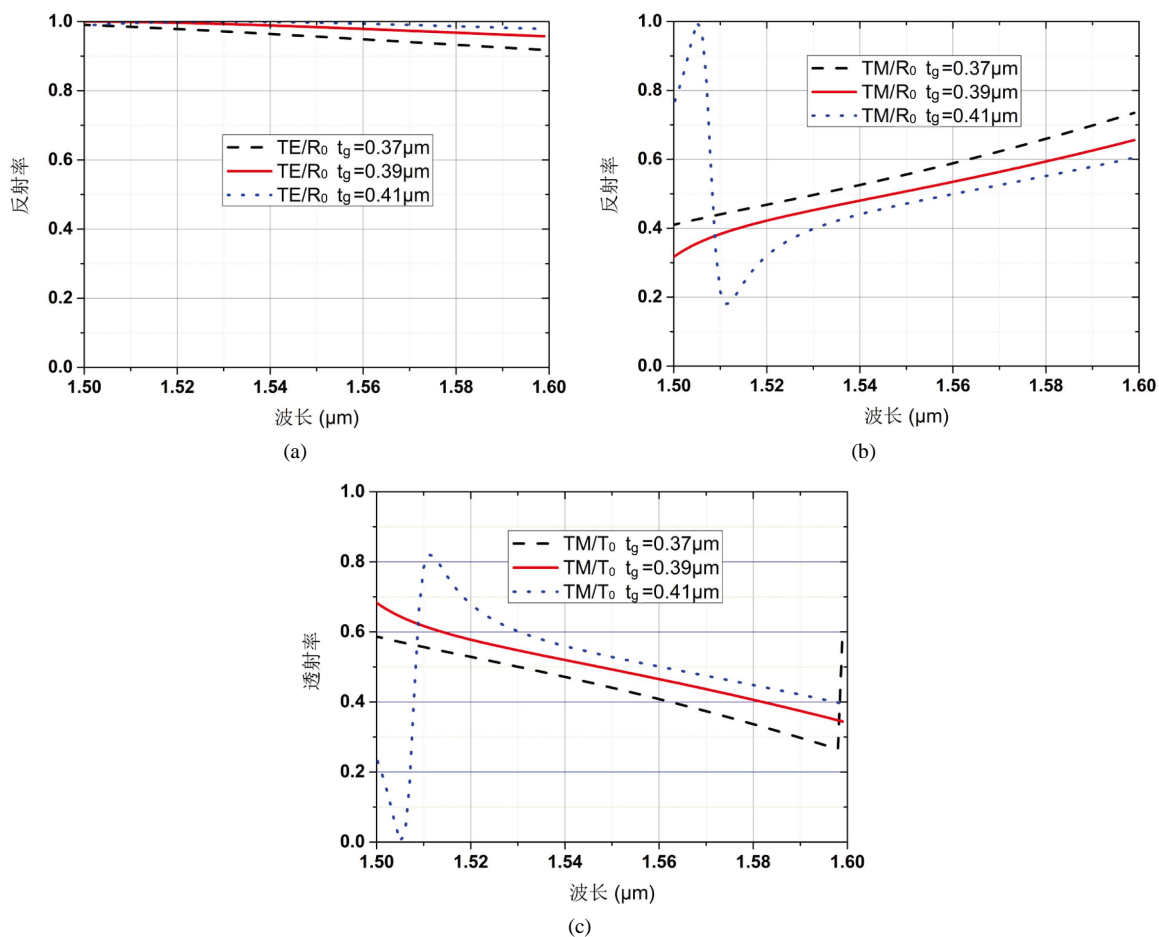


Figure 6. Spectra of variations in grating thickness t_g . (a), (b) Reflectance (TE/R₀, TM/R₀) and (c) Transmittance (TM/T₀) of the TE and TM polarized input waves

图 6. 光栅厚度(t_g)变化对此器件 0 级衍射率的影响。(a) TE 和(b) TM 偏振光的 0 级反射率(TE/R₀, TM/R₀), (c) TM 波的 0 级透射率(TM/T₀)

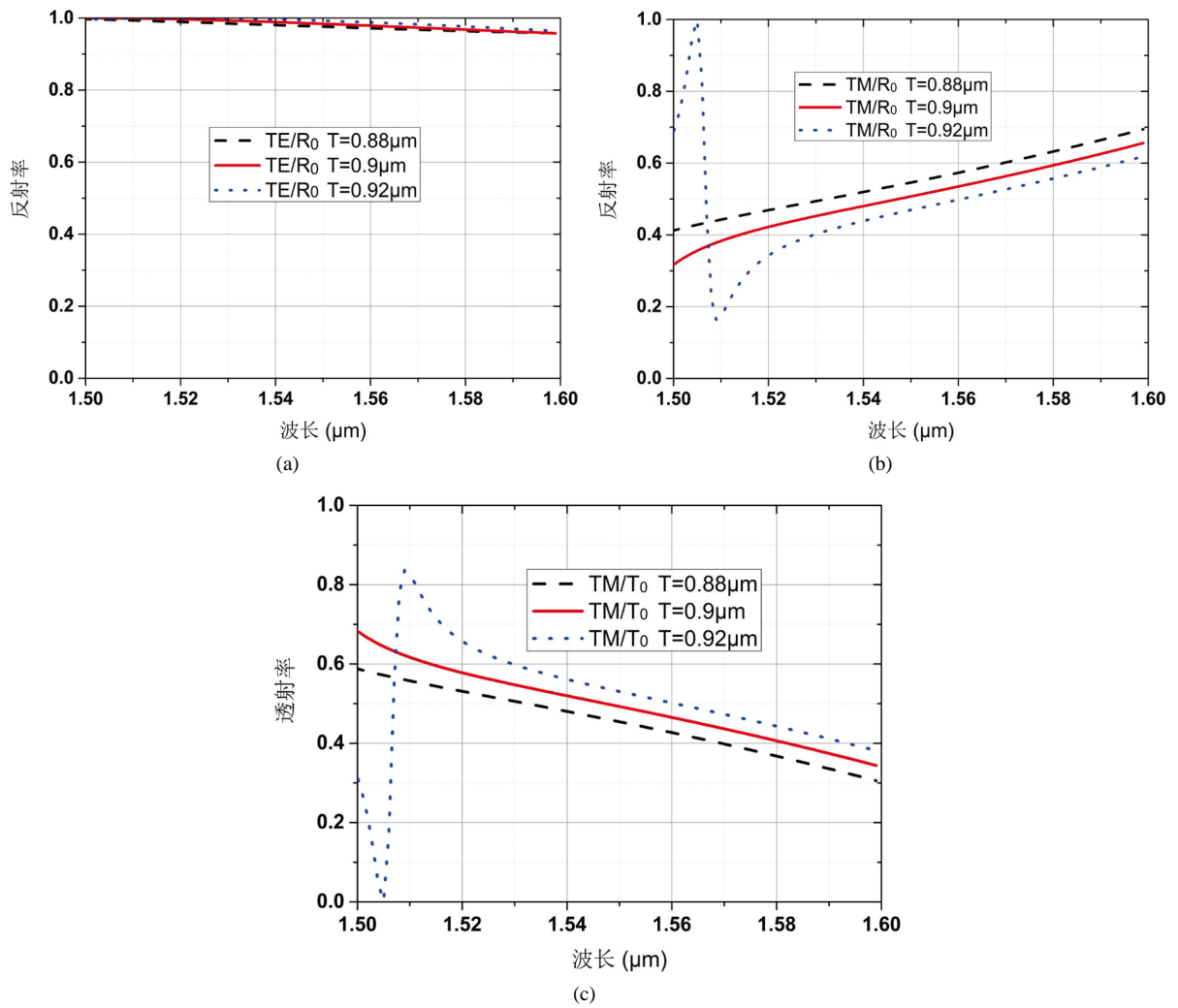
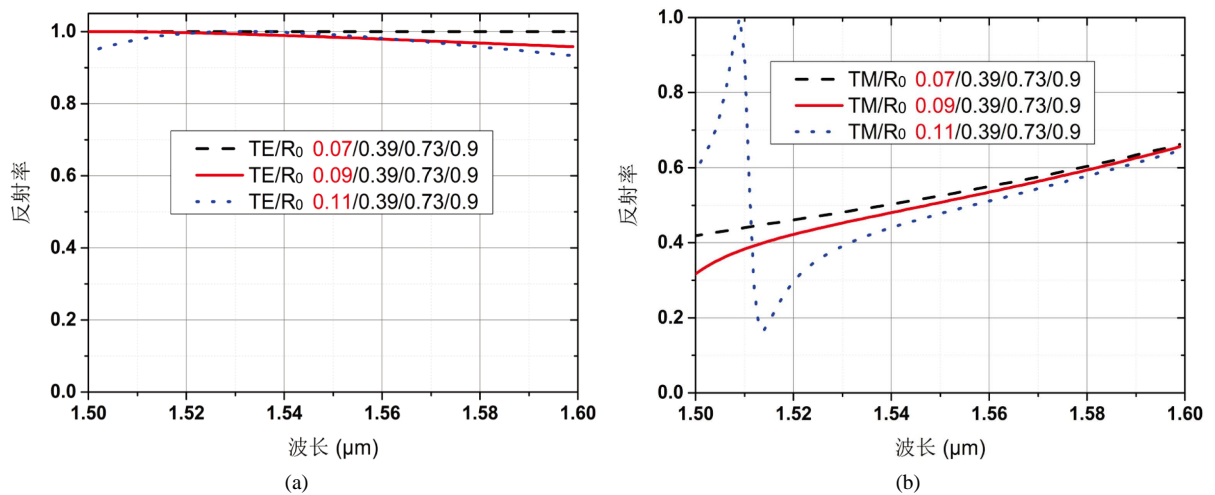


Figure 7. Effect of variation in period T . (a), (b) Reflectance (TE/R_0 , TM/R_0) and (c) Transmittance (TM/T_0) of the TE and TM polarizations

图 7. 光栅周期(T)变化对结构 0 级衍射率的影响。(a) TE 和(b) TM 偏振光的 0 级反射率(TE/R_0 , TM/R_0), (c) TM 波的 0 级透射率(TM/T_0)



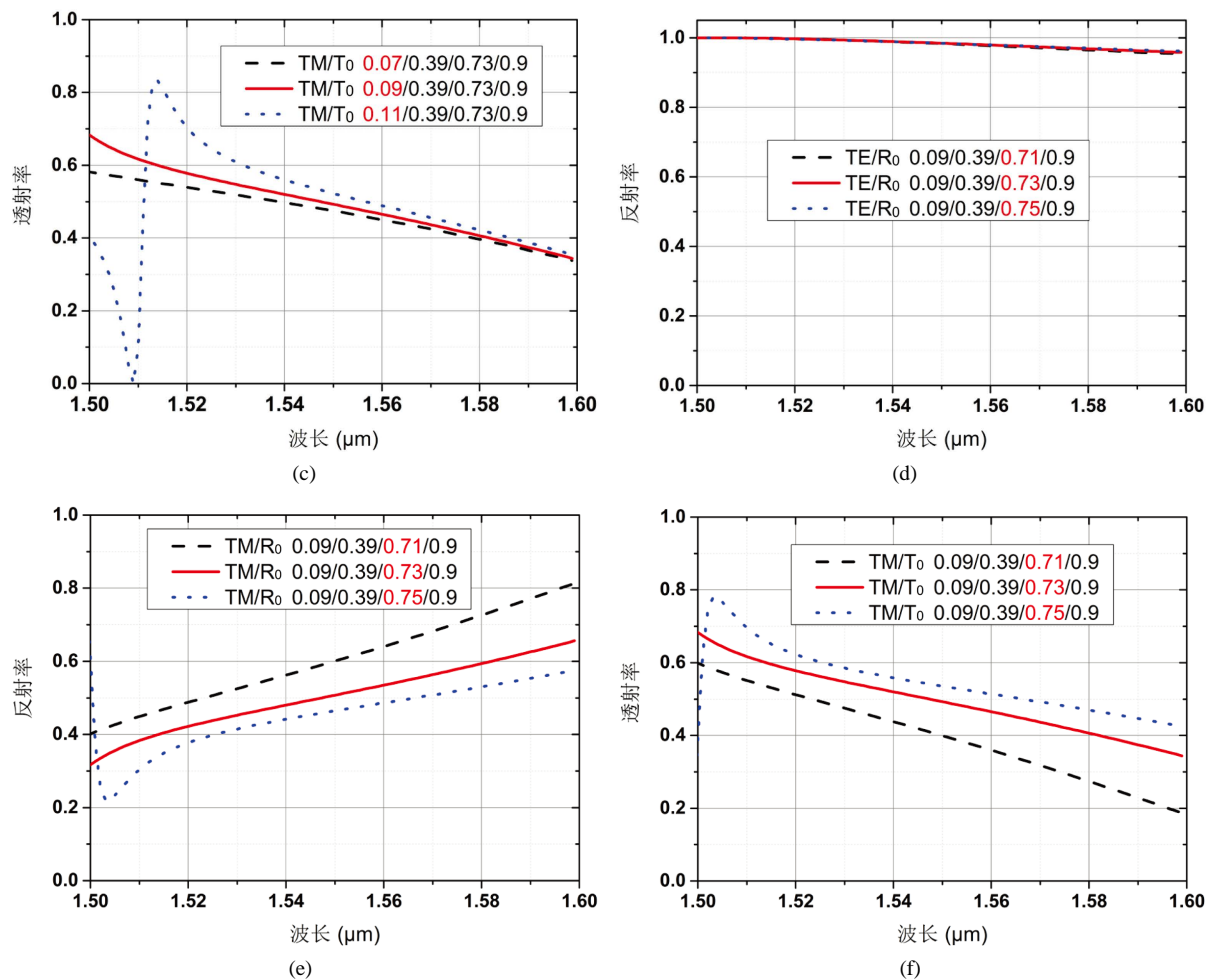


Figure 8. Spectrum response of the PSBS under the variation of the profile modulation. (a), (b) Reflectance (TE/R_0 , TM/R_0) and (c) Transmittance (TM/T_0) with varying the first high-index binary block (x_1) for TE and TM polarized input wave. (d), (e) Reflectance (TE/R_0 , TM/R_0) and (f) Transmittance (TM/T_0) with varying the second high-index binary block (x_3) for TE and TM polarized input wave

图 8. 调制形状变化对双功能偏振分束器 0 级衍射率影响。第一二元块(x_1)尺寸变化对器件(a) TE 和(b) TM 波的 0 级反射率(TE/R_0 , TM/R_0), (c) TM 波的 0 级透射率(TM/T_0)的影响; 第二二元块(x_3)尺寸变化对器件(d) TE 和(e) TM 波的 0 级反射率(TE/R_0 , TM/R_0), (f) TM 波的 0 级透射率(TM/T_0)的影响

5. 小结

本文中, 基于高折射率差材料以及多齿形状调制光栅层, 设计了一种高性能的亚波长多齿双功能光栅偏振分束器。通过分析表明, 在 120 nm (1.46~1.58 μm)宽谱范围内, 该器件 TE 偏振光的 0 级反射率大于 97%, 角度带宽为 27.6°; 而在 1.55 μm 波长处, 此结构对于 TM 偏振光能够实现 50/50 反射与透射光束比。此外, 考察了器件参数结构变化对 0 级衍射谱的影响。数值分析表明, 光栅厚度、周期、调制形状在一定得误差内, 对 0 级衍射谱的影响较小。所以该结构具有比较合理的工艺容差性能, 这点有利于器件制作。本文设计的双功能偏振分束器只需一层简单的亚波长光栅, 这使得它能在比较宽的波段范围内易于与其他器件集成[24]。该双功能偏振分束器可以应用于通信系统路由和光开关等器件中。

致 谢

本文作者非常感谢评审专家在论文评审过程中给予的很好的建议, 我们也非常感谢南昌航空大学无

损检测与光电传感技术及应用国家地方联合工程实验室微纳光电器件及材料小组提供的有益帮助。

基金项目

国家自然科学基金(11264031), 江西省青年科学基金重大项目(20143ACB21011), 江西省自然科学基金(20151BAB207054, 20114BAB201019), 南昌航空大学研究生创新专项基金(YC2015042), 南昌航空大学博士启动基金(EA201008232)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] Liang, T.K. and Tsang, H.K. (2005) Integrated Polarization Beam Splitter in High Index Contrast Silicon-on-Insulator Waveguides. *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, 393-395. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2004.839462>
- [2] Ojima, M., Saito, A., Kaku, T., et al. (1986) Compact Magneto-optical Disk for Coded Data Storage. *Applied Optics*, **25**, 483-489. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.25.000483>
- [3] Song, Q.W., Lee, M.C. and Talbot, P.J. (1992) Polarization Sensitivity of Birefringent Photorefractive Holograms and Its Applications to Binary Switching. *Applied Optics*, **31**, 6240-6246. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.31.006240>
- [4] Gao, W., Zhou, X., Zhang, J., et al. (2008) A Proof-of-Principle Experiment of Eliminating Photon-Loss Errors in Cluster States. *New Journal of Physics*, **10**, Article ID: 055003. <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/10/5/055003>
- [5] Li, L. and Dobrowolski, J.A. (2000) High-Performance Thin-Film Polarizing Beam Splitter Operating at Angles Greater than the Critical Angle. *Applied Optics*, **39**, 2754-2771. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.39.002754>
- [6] Zheng, J., Zhou, C., Feng, J., et al. (2009) A Metal-Mirror-Based Reflecting Polarizing Beam Splitter. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, **11**, Article ID: 015710. <http://dx.doi.org/10.1088/1464-4258/11/1/015710>
- [7] Zheng, J., Zhou, C., Feng, J., et al. (2008) Polarizing Beam Splitter of Deep-Etched Triangular-Groove Fused-Silica Gratings. *Optics Letters*, **33**, 1554-1556. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.33.001554>
- [8] Wu, H., Mo, W., Hou, J., et al. (2010) Polarizing Beam Splitter Based on a Subwavelength Asymmetric Profile Grating. *Journal of Optics*, **12**, Article ID: 015703. <http://dx.doi.org/10.1088/2040-8978/12/1/015703>
- [9] 张新彬. 偏振分束光栅的设计和制造[M]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- [10] Feng, J. and Zhou, Z. (2007) Polarization Beam Splitter Using a Binary Blazed Grating Coupler. *Optics Letters*, **32**, 1662-1664. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.32.001662>
- [11] 冯俊波. 硅基微纳光栅耦合器件及其制备技术研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2009.
- [12] Zheng, J., Zhou, C., Feng, J., Cao, H. and Lu, P. (2009) Polarizing Beam Splitter of Two-Layer Dielectric Rectangular Transmission Gratings in Littrow Mounting. *Optics Communications*, **282**, 3069-3075. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2009.05.011>
- [13] Yang, J., Zhou, Z., Wang, X., et al. (2011) Compact Double-Layer Subwavelength Binary Blazed Grating 1×4 Splitter Based on Silicon-on-Insulator. *Optics Letters*, **36**, 837-839. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.36.000837>
- [14] Lee, W. and Degertekin, F.L. (2004) Rigorous Coupled-Wave Analysis of Multilayered Grating Structures. *Journal of Lightwave Technology*, **22**, 2359-2363. <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2004.833278>
- [15] Wu, H., Huang, L., Xiao, Y., et al. (2013) A Wideband Reflector Realized by a Subwavelength Multi-Subpart Profile Grating Structure. *Journal of Optics*, **15**, Article ID: 035703. <http://dx.doi.org/10.1088/2040-8978/15/3/035703>
- [16] Shokooh-Saremi, M. and Magnusson, R. (2007) Particle Swarm Optimization and Its Application to the Design of Diffraction Grating Filters. *Optics Letters*, **32**, 894-896. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.32.000894>
- [17] 吴华明, 徐欢欢, 马林飞, 肖永生, 黄丽贞, 肖文波, 段军红. 宽带多齿谐振光栅反射镜的研究[J]. *应用物理*, 2016, 6(8): 167-174.
- [18] Shokooh-Saremi, M. and Magnusson, R. (2008) Wideband Leaky-Mode Resonance Reflectors: Influence of Grating Profile and Sublayers. *Optics Express*, **16**, 18249-18263. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.16.018249>
- [19] Ding, Y. and Magnusson, R. (2007) Band Gaps and Leaky-Wave Effects in Resonant Photonic-Crystal Waveguides. *Optics Express*, **15**, 680-694. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.15.000680>
- [20] Magnusson, R. and Wang, S.S. (1992) New Principle for Optical Filters. *Applied Physics Letters*, **61**, 1022-1024. <http://dx.doi.org/10.1063/1.107703>
- [21] Mateus, C.F.R., Huang, M.C.Y., Chen, L., Chang-Hasnain, C.J. and Suzuki, Y. (2004) Broad-Band Mirror ($1.12 - 1.62/\mu\text{m}$) Using a Subwavelength Grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, **16**, 1676-1678. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2004.828514>

-
- [22] Mateus, C.F.R., Huang, M.C.Y., Deng, Y., Neureuther, A.R. and Chang-Hasnain, C.J. (2004) Ultrabroadband Mirror Using Low-Index Cladded Subwavelength Grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, **16**, 518-520. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2003.821258>
- [23] Magnusson, R. and Shokooh-Saremi, M. (2008) Physical Basis for Wideband Resonant Reflectors. *Optics Express*, **16**, 3456-3462. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.16.003456>
- [24] Zhou, Z., Wu, H., Feng, J., Hou, J., Yi, H. and Wang, X. (2010) Silicon Nanophotonic Devices Based on Resonance Enhancement. *Journal of Nanophotonics*, **4**, Article ID: 041001. <http://dx.doi.org/10.1117/1.3527260>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org